

PAT-NO: JP407326024A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 07326024 A

TITLE: GMR REPRODUCTION HEAD

PUBN-DATE: December 12, 1995

INVENTOR-INFORMATION:

NAME

SMITH, NEIL

INT-CL (IPC): G11B005/39, G01R033/09 , H01L043/08

ABSTRACT:

PURPOSE: To attain GMR and DMR effects simultaneously by alternately depositing on a substrate 2N of magnetic, electrically conductive layers including a pair of outer magnetic layers and a single internal magnetic layer having a thickness of about twice that of the outer magnetic layer to attain GMR and DMR effects at the same time.

CONSTITUTION: In the GMR-DMR reproduction head structure 10; 2N of magnetic, electrically conductive layers and (2N-1) 16 of non-magnetic, electrically conductive layers 22 are alternately deposited on a substrate 12. A buffer layer 14 may be disposed between the substrate 12 and magnetic, conductive layer 16. The layers 16 include outer magnetic layers 18 and inner magnetic layers 20. The composition and thickness of the layers 20 are substantially the same as those of their upper layers 20. The composition and of the layers 16 and 18 is nominally the same as that of the layers 20 but the thickness thereof is about half of that of the layers 20. An electrically conductive, inactive layers 30 having an especially high electric resistance is deposited on the layer 18 and then a pattern of current lead structure 32 and 34 deposited thereon.

COPYRIGHT: (C)1995,JPO

----- KWIC -----

Abstract Text - FPAR (1):

PURPOSE: To attain GMR and DMR effects simultaneously by alternately depositing on a substrate 2N of magnetic, electrically conductive layers including a pair of outer magnetic layers and a single internal magnetic layer having a thickness of about twice that of the outer magnetic layer to attain GMR and DMR effects at the same time.

Abstract Text - FPAR (2):

CONSTITUTION: In the GMR-DMR reproduction head structure 10; 2N of magnetic, electrically conductive layers and (2N-1) 16 of non-magnetic, electrically conductive layers 22 are alternately deposited on a substrate 12. A buffer layer 14 may be disposed between the substrate 12 and magnetic, conductive layer 16. The layers 16 include outer magnetic layers 18 and inner magnetic layers 20. The composition and thickness of the layers 20 are substantially the same as those of their upper layers 20. The composition and of the layers 16 and 18 is nominally the same as that of the layers 20 but the thickness thereof is about half of that of the layers 20. An electrically conductive, inactive layers 30 having an especially high electric resistance is deposited on the layer 18 and then a pattern of current lead structure 32 and 34 deposited thereon.

Application Date - APD (1):  
19950523

Title of Patent Publication - TTL (1):  
GMR REPRODUCTION HEAD

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平7-326024

(43) 公開日 平成7年(1995)12月12日

(51) Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 1 1 B 5/39				
G 0 1 R 33/09				
H 0 1 L 43/08	Z	9307-2G	G 0 1 R 33/ 06	R
審査請求 未請求 請求項の数 1 O L (全 12 頁)				

(21) 出願番号 特願平7-123642

(22) 出願日 平成7年(1995)5月23日

(31) 優先権主張番号 2 4 8 7 7 2

(32) 優先日 1994年5月25日

(33) 優先権主張国 米国 (U S)

(71) 出願人 591264544

イーストマン・コダック・カンパニー  
 アメリカ合衆国、ニュー・ヨーク・14650、  
 ロチエスター、ステイト・ストリート・  
 343

(72) 発明者 ニール スミス

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 サン  
 ディエゴ フェルファーノ アベニュー  
 4080 #340

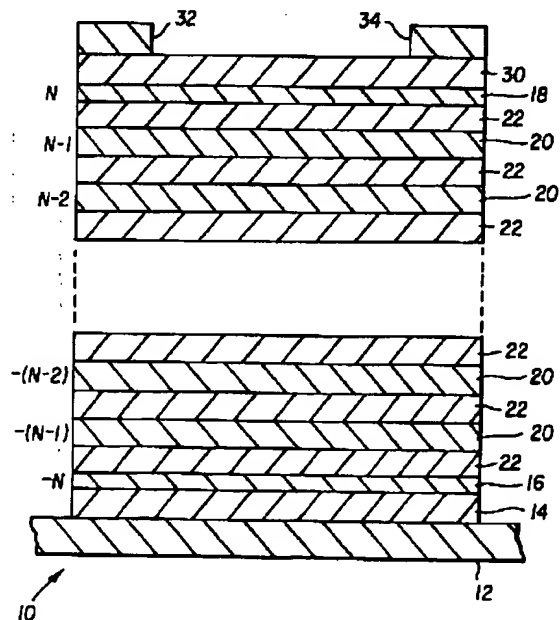
(74) 代理人 弁理士 吉田 研二 (外2名)

(54) 【発明の名称】 GMR再生ヘッド

(57) 【要約】

【目的】 GMRおよびDMRの効果を同時に達成することができる磁気抵抗再生ヘッドを製造する。

【構成】 磁性薄膜層16、18、20と非磁性薄膜層22、24とが交互に基板12上に蒸着される。中央の薄膜層24、28を境に、両側に非磁性層22を挟んだ磁性層20の組合せを形成する。



1

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板(12)と、

この基板(12)上に交互に積層形成された磁性導電層(16、18、20)および非磁性導電層(22、24)を有し、中間非磁性導電層(22、24)を間に置いて磁性導電層(16、18、20)同士に反強磁性結合を生じさせ、この反強磁性結合によって、外部磁界または電流通過によって誘発される内部磁界が作用しないときに、隣り合う磁性導電層(16、18、20)の磁化ベクトルを互いに反平行に整列させる一方で、外部磁界の作用によって隣り合う磁性導電層(16、18、20)の磁化ベクトルが回転し、ほぼ平行な配列になることによって巨大磁気抵抗効果を発揮するときに、抵抗値の変化を生じる薄膜多層構造と、この薄膜多層構造に電流通過を生じさせ、この電流通過で生じる磁界によって、ほぼ中央に位置する非磁性導電層(24)の一侧に存在する第1の磁性導電層群(16、20)における電流通過方向を横切る軸に沿った磁化有効成分に対して、その中央の非磁性導電層(24)の他側に存在する第2の磁性導電層群(18、20)における電流通過方向を横切る軸に沿った磁化有効成分の大きさが等しく、向きが反対である磁化状態を維持し、これによって前記薄膜多層構造を二重磁気抵抗再生ヘッドとして作用させる電流通過生成手段と、印加される磁界に応答してこの磁気抵抗ヘッド(10)に生じる固有抵抗変化を感知する手段とを備える磁気抵抗再生ヘッド。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、磁気再生ヘッドに関し、特に、GMR効果(giant magnetoresistance)を示す材料を用いたMR(magnetoresistive)再生ヘッドに関する。

【0002】

【従来の技術】磁気記録技術において面記録密度の限界が追求されるに従い、今後の技術としてMR再生ヘッドが出現した。例えば、最近の米国特許第5084794号や米国特許第5193038号には、DMR(dual magnetoresistive)再生ヘッド(二重磁気抵抗再生ヘッド)が開示される。このDMR再生ヘッドは、従来のSMR(shielded magnetoresistive)ヘッドに比べ、線密度性能が非常に改善されただけでなく、作動性能を強化し、製造を簡素化する。つい最近までは、DMRを含んだほぼ全ての磁気センサや磁気ヘッドは、パーマロイ(NiFe)薄膜の異方性磁気抵抗(AMR)といった物性に基づいて設計されていた。

【0003】ここ2、3年の間に、「巨大磁気抵抗」(GMR)として知られる分野への関心が高まり、研究が進んでいる。このGMRは、後述するように、AMR

2

効果よりも非常に巨大な $\Delta R/R$ 応答を有する。巨大磁気抵抗効果を示すことが観察された膜は、大まか20オングストローム程度の強磁性体膜と、この強磁性体膜と同じ程度の厚さの銀、金といった非磁性導電膜とが交互に積層されてなる。

【0004】磁気抵抗ヘッドとしてのGMR膜の電位差が大きい理由は、磁界に反応して磁気抵抗の最大変化率( $\Delta R/R$ が10~20%に及ぶこともある)が非常に大きいことに起因する。通常の異方性磁気抵抗(AMR)効果を利用した従来のMR膜では $\Delta R/R$ がほぼ2%程度であるのとは大きな違いである。一般に、GMR膜の抵抗状態が高くなるのは、GMR多層膜において、隣接する磁気層の間では磁化がほぼ反平行となるときである。GMR多層膜の抵抗状態を低くするには、磁界を作用させて各層の磁化を回転させ、磁化の向きを磁界の方向にほぼ平行にする。

【0005】米国特許第5159513号や米国特許第5206590号に教示されるような交換ビニング層を付加した3層の「スピンバルブ」構造といった特別な場合を除いて、外部磁界に反応してGMR効果を示す多層膜には、交換や静磁気といった固有のメカニズムが必要とされる。このメカニズムによって隣り合う強磁性層間に有効反強磁性結合を生じさせ、外部磁界がゼロの状態ですべての反平行は維持される。この反強磁性結合の強度は、有効結合磁界 $H_{afc}$ として表現される。ほとんどのGMR多層膜では、この有効結合磁界 $H_{afc}$ が既存の単軸異方性の強度 $H_k$ よりも通常大きい。

【0006】図1は、汎用GMRにおいて、印加された磁界Hに対する固有抵抗Rの応答曲線を示す。ヒステリシスは除かれる。最大のダイナミックレンジで最適な $dR/dH$ 感度を得るには、図示されたバイアス点でGMR多層膜を作動させる。バイアス磁界 $H_b$ は、ほぼ $(H_{afc} + H_k)/\sqrt{2}$ 、すなわち、概略 $H_{afc}/\sqrt{2}$ が必要とされ、これによって、磁化を角度45度程度回転させ、 $\sin\theta_b$ がほぼ $1/\sqrt{2}$ となるようにする。ただし、パターン化された小さなGMR再生ヘッド素子では、 $H_k$ を $(H_k + H_d)$ で置換する。ここで、 $H_d$ は、要素の形状依存消磁界であり、その磁界はかなり大きく、例えば100~200Oeである。

【0007】ごく最近では、GMRに関する研究は材料の開発に向けられている。有効結合磁界 $H_{afc}$ が低く、かつ、 $\Delta R/R$ が大きい材料によって固有感度 $\Delta R/R/H_{afc}$ を最大にしようとしている。最新の情報によれば、 $\Delta R/R$ が4~5%であって $H_{afc}$ が5~100Oeのときに $\Delta R/R/H_{afc}$ の最大値が得られることが報告されている(Hylton et al., 1993年発行「SCIENCE」, vol. 261, pp1021~1024)。しかし、このように報告された $H_{afc}$ や $\Delta R/R$ のウェハーレベルは、一般に、極めて小さな電流密度において測定されていて、その電流密度は、上

述のGMR材料を適用すべく考慮された実際のミクロンサイズGMR再生ヘッドとは比べものにならない。図2は、電流密度 $J$ が一定の時、厚さ $T$ の薄膜に生じる内部電流磁界 $H_j(x, y)$ の空間分布を示す。ほぼ近似させると、 $H_j(x, y)$ は、電流密度 $J$ の単位を $\text{amp}/\text{cm}^2$ とした場合、ほぼ $(2\pi/5) J \times Oe$ で表される。

【0008】電流磁界 $H_j(x)$ は、膜中心( $x=0$ )に関して点対称に現れる。すなわち、 $H_j(-x)=-H_j(x)$ である。これは、図1に示す一様のバイアス磁界 $H_b$ とは対照的である。広くいえば、既存の技術や手法を用いて、このような一様にバイアスされたGMR多層膜が測定しようとする信号磁界 $H_{sig}(x, y)$ の対称成分 $H_{sig-s}(x, y)=[H_{sig}(x, y)+H_{sig}(-x, y)]/2$ とは対照的なものである。電流磁界 $H_j(x)$ は、 $\sin \theta_j(x)$ がほぼ $H_j(x)/H_{afc}$ をとるような線対称的なバイアス角度分布を誘導する。ここで重要なことは、このバイアス角度分布は、 $H_d$ の大きさによって左右されないことである。 $\sin \theta_j(x)$ の線対称性からその平均はゼロになるからである。続いて、 $\sin \theta_b$ がほぼ $1/\sqrt{2}$ に従った一様なバイアス角度分布に重ねられた場合(可能であれば非線形的に)、非対称な $\theta$ 分布が得られる。この $\theta$ 分布は、GMR多層膜の厚さによって歪めることができる。 $H_{j-max}=H_j(x=T/2) \geq H_{afc}$ である場合、内部GMRバイアス分布に相当の歪みが生じる。このバイアス分布では、多層構造の厚さ方向の両側は、事実上バイアスがかけられるか( $|\sin \theta| \ll 1/\sqrt{2}$ )、飽和する( $|\theta|$ はほぼ $\pi/2$ )。このようなバイアスの歪みは、一様な(対称な)バイアス磁界を生じる磁界源を付加しても補償しきれない。

【0009】将来、ミクロン以下のトラック幅の超高密度記録を利用するには、従来のAMRヘッドやスピナルブGMRを $10^7 \text{ amp}/\text{cm}^2$ 以上の電流密度で動作させる必要がある。そうしないと十分な信号レベルに達しない。再生信号の大きさは電流密度に直接関連するので、GMR多層ヘッドでは、大きな固有 $\Delta R/R$ の利益を可能な限り得るためには、前記と同等の電流密度 $J$ で動作しなければならない。例えば、厚さ $T=400$ オングストロームのGMR多層膜では $H_{j-max} \geq 250e$ といった具合となる。250e以上の $H_{afc}$ を有するGMR多層はこういった電流密度で動作する場合、前述のようなバイアス磁化分布の歪みが予想され、必然的に、使用可能な $\Delta R/R$ が著しく低下し、線形なダイナミックレンジが失われ、再生信号の非線形歪みが増加してしまう。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】上述のDMRを除き、単層AMR膜やGMRスピナルブ、一様にバイアスされたGMR多層膜を用いる従来のMRヘッドには、いず

れにも $1/10$ ミクロン単位のMRシールドギャップと云った磁気シールド構造が必要とされる。これによって、将来の超高密度記録装置に相応しい十分な線形再生解像力を得ることができる。ただし、近接配置された導電磁気シールドからMRヘッドを電氣的に確実に絶縁させることは技術的に非常に困難であったり、シールド構造がMR素子にバイアスをかける設計の選択を狭めてしまうという問題もある。

【0011】一様にバイアスされたGMR多層膜に関して、現在よく使用される技術はセンス電流自己バイアスを用いる。このセンス電流自己バイアスは、例えば、電流分路(current shunt)や軟磁性隣接層(magnetically-soft-adjacent-layers)といったバイアス層を付加的に挿入することによって生成される。 $H_k$ が4~50e程度の異方性磁界が小さい従来のAMR膜の場合でさえ、よく知られているように、こういった隣接層を用いたバイアス手法では、バイアス電流密度を $10^7 \text{ amp}/\text{cm}^2$ 以上に増加させて十分なバイアスレベルを達成する必要がある。こうすれば、MR素子の高さが1ミクロン以下に縮小されても問題はなく、前述と同様の将来の再生トラック幅を達成することができるであろう。ただし、この場合にも、上述のGMR多層膜における線対称的な自己バイアス成分の付加による悪影響が助長される。

【0012】このような悪影響を軽減させるには、前述したように、30~1000e程度の $H_{afc}$ を有するGMR材料を開発して適用すればよい。しかし、これによって、シールドGMR多層膜の十分かつ一様なバイアスに必要とされる電流密度のレベルが上昇し、結局、内部バイアスの問題などが悪化する。しかも、バイアス層の付加によって一般的にMR層に電気分流が生じることから信号レベルも低下してしまう。

【0013】GMR多層膜において $\sin \theta$ がほぼ $1/\sqrt{2}$ となる一様なバイアス状態が好ましいのは、この状態では、いかなる信号の対称成分をも検知する再生感度/ダイナミックレンジを最大にすることができるからである。こういったバイアス状態を達成することがいかに困難であるかはこれまで簡単に説明してきた。しかし、線対称的な信号磁界成分 $H_{sig-a}(x, y)=[H_{sig}(x, y)-H_{sig}(-x, y)]/2$ を検出するためには、例えば、GMR多層膜の内部センス電流自己バイアス状態といったほぼ線対称的なバイアス状態も最適である。線磁気記録密度が高い状態では、 $H_{sig-s}$ と $H_{sig-a}$ の振幅が等しくなり、いずれかを検出することによって磁気媒体に記録された情報を再生することができる。上述の米国特許第5084794号や米国特許第5193038号に記載されるように、DMRは、線対称的な自己バイアスMRヘッドであって $H_{sig-a}$ に固有感度を利用するものの一例である。このDMRでは、磁気シールドを用いずに、実際に製造可能な微小ギャップ

シールドMRヘッドに対して高密度信号レベルおよび優良な線解像度を達成することができる。

【0014】本発明は、高密度磁気記録の分野で将来期待されるシールドMR再生ヘッドの設計にあたって、既存のAMR膜に代えて、GMR多層膜を用いる際に認められる上記の問題点を克服することを目的とする。

【0015】

【課題を解決するための手段および作用】上記目的を達成するために、本発明によれば、GMR多層再生ヘッドは、内部センス電流自己バイアスを利用して「GMR-DMR」ヘッドを確立する。シールドのないGMR多層は、合理的な電流密度によって完全に自己バイアスがかけられ、しかも、前述の米国特許第5084794号や米国特許第5193038号に教示されるように、既存のDMRヘッドに固有の有利な高密度再生性能と同等の機能を発揮する。その上に、GMR材料の「巨大」磁気抵抗効果によってかなり大きな固有感度を得られる。

【0016】また、完全に線対称的なGMR-DMRバイアス磁化状態では、固有の反強磁性層を挟んだGMR多層結合によって静磁安定性ほど好都合なものではなく、製造が困難とされる単一ドメイン安定化／バルクハウゼンノイズ抑圧複合手段（complex single-domain-stabilization/Barkhausen-noise-suppression means）の必要を除去し、トラック幅および要素の高さにおいてサブミクロンサイズに適したGMR-DMR構造を形成することができる。このサブミクロンサイズが達成されれば、将来、従来の実用的なMRヘッドに代えて、超高密度再生ヘッドへの適用が期待される。

【0017】以上のことから、本発明によれば、GMR-DMRセンサまたはGMR-DMR再生ヘッドは、基板と、この基板上に交互に積層形成された磁性導電層および非磁性導電層を有し、中間非磁性導電層を間に置いて磁性導電層同士に反強磁性結合を生じさせ、この反強磁性結合によって、外部磁界または電流通過によって誘発される内部磁界が作用しないときに、隣り合う磁性導電層の磁化ベクトルを互いに反平行に整列させる一方で、外部磁界の作用によって、磁性導電層の隣り合う平面領域の磁化ベクトルが回転し、ほぼ平行な配列になることによって巨大磁気抵抗効果を発揮するときに、抵抗値の変化を生じる薄膜多層構造と、この薄膜多層構造に電流通過を生じさせ、この電流通過で生じる磁界によって、ほぼ中央に位置する非磁性導電層の一侧に存在する第1の磁性導電層群における電流通過方向を横切る軸に沿った磁化有効成分に対して、その中央の非磁性導電層の他側に存在する第2の磁性導電層群における電流通過方向を横切る軸に沿った磁化有効成分の大きさが等しく、向きが反対であるバイアス磁化状態を維持し、これによって前記薄膜多層構造を二重磁気抵抗再生ヘッドとして作用させる電流通過生成手段と、印加される磁界に

応答してこの磁気抵抗ヘッドに生じる固有抵抗変化を感じ取る手段とを備える。

【0018】このようなGMR-DMRセンサまたはGMR-DMR再生ヘッドでは、外側磁性膜層は、多層構造内で比較的一様な厚みを持った内部磁性膜層よりも実質的に薄く（例えば、50%の厚み）すれば、外側磁性膜層と内部磁性膜層の間での自己バイアスレベルの変化を低減することができる。

【0019】磁性膜層の数と非磁性膜層の数とは必ずしも同じである必要はないが、中央の磁性膜層か非磁性膜層から両側へ、N枚の磁性膜層と（N-1）枚の非磁性膜層とが鏡写しになるように2組に分かれているとよい。その中央膜層を十分に厚く形成すれば、特に、中央膜層が非磁性膜層の場合には、N枚の磁性膜層および非磁性膜層からなる第1および第2膜層群における電流通過方向を横切る軸に沿った有効磁化成分を互いに等しく、向きを反対にすることができる。

【0020】

【実施例】図3は、本発明の第1実施例に係るGMR-DMR再生ヘッド（センサ）構造10の断面図を示す。基板12の上面には、2N枚の磁性導電層と、（2N-1）枚の非磁性導電層22とが交互に蒸着されている。この場合、基板12と磁性導電層との間には緩衝層14を介在させてもよい。磁性導電層は、外側磁気層16、18や内部磁気層20を含んでいる。非磁性導電層22の組成および厚みは、名目上、内部磁気層20のそれらと同様である。外側磁気層16、18の組成も、名目上、内部磁気層20のそれらと同様であるが、外側磁気層16、18の厚みは、内部磁気層の厚みの約半分である。外側磁気層18の上面には、電気抵抗が特に高い導電不活性化層30が蒸着される。この導電不活性化層30の上面には、電流リード構造32、34のパターンが蒸着される。この蒸着には、周知のフォトリソグラフィ技術が用いられる。

【0021】一般に、各層の組成や厚みを設定することによってGMR-DMRヘッドの特性が最適化される。この設定によって、例えば、結合磁界強度 $H_{afc}$ の大きさを左右する係数 $\Delta R/R$ を最大にすることもできる。外側磁気層16、18には、各々、「-N」と「N」といった番号付けがなされ、内部磁気層20には、中央の非磁性導電層（図4参照）から外側に向かって順番に番号が付される。この構造の製造は比較的単純であり、バイアス層や安定化層の蒸着を必要とせず、最終的に1度だけマスキングを行って電流リード構造32、34のパターンを形成すればよい。

【0022】図4は、GMR-DMR素子層の基本的構造を示す部分斜視図である。この図に基づいて本実施例の様々な形状パラメータや磁気パラメータが定義される。この場合、Nは2桁程度である。説明を簡略化するために、基板12、緩衝層14、不活性化層30、電流

リード構造32、34は示されていない。中央の非磁性導電層24を出発点として多層構造の各磁気層に1〜Nや-1〜-Nといった番号が添えられる。内部磁気層20は厚みtを持ち、非磁性導電層22、24は厚みgを持つ。いずれも、一般に2nm程度である。外側磁気層16、18の厚み $t_N = t_{-N}$ は内部磁気層20の厚みtの約半分である。高密度再生ヘッドでは、GMR-DMRセンサ構造10のストライプ方向の高さLは約1μmである。

【0023】一般に、磁気層16、18、20は磁界の存在下で蒸着される。この磁界によって、Z軸に沿ったストライプの長手方向に単軸磁気異方性の軸を描えることができる。一般に、異方性磁界 $H_k$ によって特徴づけられる異方性強度は100e以下である。磁気層16、18、20は、鉄やコバルト、ニッケルを含む合金であって、1以上の合金組成からなる2層としてもよい。非磁性導電層22、24は、銅や金、銀、それらの合金が蒸着されて形成される。

【0024】図3および図4に基づき詳述されるGMR-DMR再生ヘッドの性能および装置物性を評価する際に重要なことは、GMR多層における磁性層間の介在層結合の本質を理解することである。こういった結合メカニズムは、主として、隣接する磁気層間の交換結合によると考えられる。単位面積当りの相互作用エネルギーは次式で表される。

$$【0025】K_{afc} \cos(\theta_n - \theta_{n+1}) + K_{bqc} \cos^2(\theta_n - \theta_{n+1})$$

この式では、「反強磁性結合磁界」 $H_{afc}$ は $4K_{afc} / (M_s t)$ によって定義され、「4次結合磁界」 $H_{bqc}$ は $8K_{bqc} / (M_s t)$ によって定義される。ここで、 $M_s$ は磁性層の飽和磁化である。いまのところ、介在層交換結合の等式に対して4次成分を挿入することが重要なことを裏付ける証拠は増え続けている。その $H_{bqc}$ の大きさは反強磁性結合磁界 $H_{afc}$ に十分に対抗することができ、むしろ反強磁性結合磁界 $H_{afc}$ よりも大きいともいえる。これまでは、その反強磁性結合磁界 $H_{afc}$ のみが介在層の交換相互作用を特徴づけていると考えられていた。

【0026】図5はR-H測定値を示す。ここでは、様々な平均ストライプ電流密度Jに対する $(\delta R/R)$ 抵抗変化が表されている。外部印加磁界Hはストライプを横切る(y軸に沿った)方向に向いている。ただし、グラフ一番下の曲線だけは、外部印加磁界Hはストライプの長手方向に向いている。これらの実験結果は、膜層

の数を $2N=10$ としたNiFeCo-CuのGMR多層膜によって得られた。各種のパラメータは、アラバマ大学のMINTセンターから提供された値、すなわち、 $4\pi Ms=8000G$ 、 $H_k=40e$ 、 $t=g=2nm$ および $L=12$ ミクロンに設定された。純粋な熱(ジュール熱)による影響を排除するために $|\delta R|_{max}/R = \Delta R/R$ に対してデータ値は補正された。この熱の影響は、温度調整オープン内で独立して測定された。観察された $(\Delta R/R)$ における残り1/3の縮小分、電流密度 $J=1.25 \times 10^7 \text{ amp/cm}^2$ の曲線では6%から4%への縮小分は、内部センス電流自己バイアスの上述の効果を直接示すものである。このことは、図4に示すマイクロ磁性のシュミレーションとの比較によっても確認される。Jの低いデータ曲線における最大値の半分の幅にほぼ適合する $H_{afc}=400e$ を用いて、 $H_{bqc}=0$ (ドット線)や $H_{bqc}=H_{afc}$ (ダッシュ線)と仮定する。 $H_{bqc}=H_{afc}$ の場合の理論値は、全てのJに対する曲線において、観察された $\Delta R/R$ のセンス電流自己バイアスによる減少を予測するものである。

【0027】特に、 $H_{bqc}=H_{afc}$ のシュミレーションは、Jの低いデータ曲線における「三角形」曲線に非常によく対応している。この現象は、実験研究された多くのGMR多層システムに共通している。しかも、この現象は、反強磁性層間結合のみが存在する場合、すなわち、 $H_{bqc}=0$ である場合に理論的に予測される放物曲線によっては説明することができない。Jの高いデータ曲線の場合、ほぼ $H=0$ に対して非対称性を示す。この非対称性は、実験に使用されたGMR試料の厚み方向の膜特性が非対称かつ一様でないことの現れである。この現象は、理論的シュミレーションによっては予測することができない。ただし、長手方向に外部磁界を作用させた場合、特性の非一様性に影響を受けない。Hは電流磁界 $H_J$ に垂直だからである。この場合でも、 $H_{bqc}=H_{afc}$ である場合に理論と実験とが適切に一致するが、 $H_{bqc}=0$ の場合には、ほとんど一致しない。

【0028】図5のシュミレーションに用いられたマイクロ磁性モデルを近似的に解析すると、図4に示す構造について、センス電流自己バイアスによるn番目の磁性層( $-N \leq n \leq N$ )における平均バイアスレベル $\langle \sin \theta_n \rangle$ (ここで、 $\langle \rangle$ は素子高さLにわたる平均バイアスレベルを示す)を正確に以下の3次方程式の解から評価することができる。すなわち、

【数1】

$$\frac{9}{10} \langle \sin \theta_n \rangle [1 + (H_{bqc}/H_{sat}) (2 \langle \sin \theta_n \rangle^2 - 1)] = H_{Jn}/H_{sat} \quad (1a)$$

$$(\langle \sin \theta_n \rangle < 1)$$

ここで

$$H_{Jn} = \text{sgn}(n) (2|n| - 1) (g + t) (\pi J/5), \quad (1b)$$

$$(H_{Jn} \text{ in Oe with } J \text{ in amp/cm}^2)$$

$$H_{sat} = (H_{afc} + H_k) / (1 - \epsilon), \quad \epsilon = (2\Lambda/L) \tanh(L/2\Lambda) \quad (1c)$$

$$\Lambda = [(1/10) (2N-1)^2 4\pi M_s t g + 2A/M_s] / (H_{afc} + H_k)]^{1/2} \quad (1d)$$

$$t_N/t = r_N \approx (N-1)/(2N-1) [1 + N/(2N-1)^2 (1 + H_k/H_{afc}) / (1 + g/t)] \quad (1e)$$

また、 $\Lambda$ は磁性層の層間交換の剛性である。 $H_{bqc} \leq H_{afc} + H_k$  の場合には、式(1)から、例えば、 $L$ が低く(例えば、 $1 \mu\text{m}$ 以下)、 $J$ が適度に高い(例えば、 $10^7 \text{ amp/cm}^2$ 以上)実用的な条件下で正確な予測を与えることができる。

【0029】

【数2】

$$t_N/t = r_N \approx (N-1)/(2N-1) \approx 1/2$$

式(1e)を多層膜に限定するには、この式を満足させれば、最外側の $\pm N$ 番目の磁性層が一方に隣接する磁性層とのみ交換結合されている事実が補償される。この場合には、最外側磁性層は内側磁性層のほぼ半分の層間交換トルクしか有しない。条件 $t_N = r_N t$ は、 $\langle \sin \theta_n \rangle$ と $n$ との関係における振動を起因させるもの、例えば、 $t_N = t$ や $H_{afc} \gg H_{sat} - H_{afc}$ といった条件を解消する。この振動は式(1a)では得られず、GMR-DMRヘッドの動作に有害となる。大まかにいって、この効果は、同軸伝送路(coaxial transmission line)を適切に切断し反射を抑制することに類似する。

【0030】従来のDMRのように、GMR-DMRセンサは、主に、横方向信号磁界 $H_{sig-a}(x, y) = [H_{sig}(x, y) - H_{sig}(-x, y)]/2$ の反対称成分に応答する。パラメータ $\Lambda$ は、 $H_{sig-a}(x, y)$ によって記録磁気媒体から生成された信号磁束に対するGMR-DMR磁束伝播長を物理的に表し、式(1c)における量 $\epsilon$ は、最大効率 $\epsilon = 1$ に対応したGMR-DMRの線磁束効率を近似的に表す。図6は、 $N=5$ および10であって、 $H_{afc} = 20, 40, 80 \text{ Oe}$ 、その他の代表的なパラメータ値 $4\pi M_s = 104 \text{ G}$ 、 $H_k = 50 \text{ Oe}$ 、 $t = g = 2 \text{ nm}$ 、 $A = 10^{-6} \text{ erg/cm}$ とした場合の磁束効率 $\epsilon$ と素子高さ $L$ との関係を示す。GMR-DMRバイアスレベル $|\langle \sin \theta_n \rangle|$ を式(1a)(1b)の $|n|$ では不均一であるので、一般\*

に、 $J$ を選択して最適バイアス点を達成すれば、妥協的に用途が特定され、内側磁性層や外側磁性層のアンダーバイアスやオーバーバイアスによる非線形歪みを最小化するとともに、最適な信号レベルを達成し、 $J$ に線形な変化をもたらす。「最適」バイアス電流 $J_{opt}$ は、 $2N/3 \leq n \leq N$ を満足する条件 $|\langle \sin \theta_n \rangle| = 1/\sqrt{2}$ を達成する範囲であると思われる。式(1a)を用いると、この基準は条件 $H_{Jn} = H_{sat}/\sqrt{2}$ に反対するが、 $H_{bqc}$ の値と無関係になることが予想されることから、設計の立場から考慮すると単純で堅実である。図7は、本発明の論証の目的上控え目に $n = N$ を選択し、図6に使用されたものと同じパラメータを仮定した $J_{opt} - L$ 曲線を示す。

【0031】将来の超高密度磁気記録装置、特にディスク装置には、サブミクロンの再生トラック幅が必要であり、このことは、長手方向に延びるヘッドの形状において素子の高さを小さくする(小さいほど好ましい)必要を生む。長手方向に延びるヘッドはこれからのMR再生ヘッドで最も用いられるであろうデザインである。図6および図7の結果は、GMR-DMRがこのサブミクロン素子の高さ設定に本質的に適している事実の現れである。これによって、ほぼ50%以上の固有磁束効率を達成するとともに、高くはあるが大きいすぎないバイアス/センス電流密度(約 $2 \times 10^7 \text{ amp/cm}^2$ ) $J_{opt}$ を達成することができる。さらに、 $J_{opt}$ の大きさは $L < 1 \mu\text{m}$ の素子高さに対してあまり影響を受けない。このことは、既存の自己バイアスヘッド(例えば、軟質隣接層バイアスMRや従来DMR)と比較してもいえることである。こういった既存の自己バイアスヘッドでは、実際の設計上、サブミクロン $L$ で $J_{opt} = 1/L^2$ が成立し、最適なバイアスを得るために、 $10^8 \text{ amp/cm}^2$ に到達するような実用不能なほど高い $J$ の値が必要とされる。小型素子高さなどを設定する際の製造許容差によってさらに可変性が大きくなる。こういったGMR-DMR特性は、一般的な場合では、長さパラメータ $\Lambda$



11

《 $1\mu\text{m}$  (式(1d))と物理的に小さいことから生じる。この条件によって効率 $\epsilon$ が低減する傾向があり、これによって $J_{\text{opt}}$  および $H_{\text{sat}}$  は、式(1c)(1d)において所定の $J$ で得られるバイアスレベル振幅に対する $\epsilon$ 依存の交換限界と静磁的(形状異方性)限界とに対して影響され難くなる。 $\epsilon=1$ の多くの従来設計と比較して、GMR-DMRの幾分低い固有磁束効率 $\epsilon$ は、これらの同じ代替えとなるMRヘッド設計に一般に必要な付加的な非MR導電バイアス層からの電気分流損失がないことによって主に補償される。

【0032】どのようなMRヘッドでも、再生信号レベルおよび線解像度はヘッドの固有スペクトル反応関数 $F(\lambda)$ に関して定量的に説明される。この関数は、関係式 $\delta R(\lambda)/\Delta R = (M_r \delta / M_s T_H) [(1 - \exp(-2\pi\delta/\lambda)) / 2\pi\delta/\lambda] \exp(-2\pi d/\lambda) F(\lambda)$ から定義される。この関係式は、正弦記録磁気媒体の再生から生じる線形化記録磁気媒体の振幅を説明するものである。ここで、 $M_r \delta$ は、記録磁気媒体の残留磁気と厚さの積であり、 $\lambda$ は記録波長であり、 $d$ はヘッドおよび媒体間の間隔、 $T_H = (N-1/2)t$ は総GMR-DMR厚みの半分である。スペクトル反応関数 $F(\lambda)$ は、特に比較に有用であって、その理由は、この関数が所定のヘッドの固有再生能力を反映し、媒体、ヘッド/媒体間インタフェース、記録プロセスの詳細とは無関係であるからである。

【0033】図8は、素子高さ $L=0.7\mu\text{m}$ のGMR-DMRヘッドに対する $F(\lambda)$ の数値計算結果を示す。このとき、図7のように、 $H_{\text{afc}}=400\text{e}$ 、 $N=5$ または $10$ 、 $H_{\text{bqc}}=(0, 1, 2)\times H_{\text{afc}}$ 、 $N=5$ または $10$ に対して $J_{\text{opt}}=(2.1\text{または}1.4)\times 10^7\text{ amp/cm}^2$ やその他の上述のパラメータ値が用いられる。 $N=5$ の曲線の $F(\lambda)$ のピーク値は、 $N=10$ のときの約56%程度である。図6に示す相対効率の比率から予測される61%の値と良く一致する。 $F(\lambda)$ では、 $N=10$ であって $\lambda=G^- = 0.060\mu\text{m}$ および $H_{\text{bqc}}=0$ の場合に観察されるゼロ(nul)は、有効DMR再生ギャップ $G^-$ が $G^- = 4N(g+t)/3 = 0.053\mu\text{m}$ にかなり近いことを示す。この $0.053\mu\text{m}$ といったギャップは、式(1a)で予測される線形バイアス分布 $|\sin\theta_n| = 2|n|-1$ の条件の下で一般的に評価されるものである。ただし、式(1a)における非線形な $H_{\text{bqc}}$ 項はさらに一様なバイアスプロファイルをもたらし、有効DMR再生ギャップ $G^-$ は低減する。

【0034】式(1)から既に予測されたように、図8には、GMR-DMRの再生特性(最も著しくは、効率または $F(\lambda)$ のピーク振幅)は、特に $H_{\text{bqc}} \leq H_{\text{afc}} + H_k$ の場合、あまり $H_{\text{bqc}}$ の影響を受けない。後者の条件によって、4次結合項の非線形な本質に基づく硬軸ヒステリシスの可能性もが排除される。したがって、後

12

者の条件は、実用的なGMR多層材料をこれから開発し続ける上で一層必要とされる一般的基準となるであろう。図5に示すように、緩やかな4次結合の存在によって、固有 $R(H)$ 応答曲線が直線化される。すなわち、傾き $dR/dH$ のバイアス点への依存性を解消する方向に役立つ。それによって、 $H_{\text{bqc}}=0$ の場合にAMRやGMRに共通する放物線 $R(H)$ から、広く知られる偶数次の歪みを低減する。これは、特にGMR-DMRに有益であり、前述したバイアスレベルの不均一性によって、全ての磁性層に対して同時に、個々に最適のバイアス点へバイアスをかけることは不可能になる。

【0035】図8には、さらに、 $N=10$ 、 $H_{\text{bqc}}=0$ としたGMR-DMR構造の場合と同じ値の $4\pi M_s$ 、 $H_k$ 、 $T_H$ および $G^-$ を用いた従来のAMR-DMRに対する $F(\lambda)$ との比較が示される。等価平均バイアスレベル $|\sin\theta| = 1/2$ ( $|\sin\theta_n| = 1/\sqrt{2} = 0.354$ )にバイアスされる。AMR-DMR結果は、Smith et alが1992年発行「IEEE Trans. Magn.」vol 28、pp 2295~2297に詳述する解析式を用いて算出された。相対効率において25%低いが、GMR-DMR構造に対する $F(\lambda)$ のスペクトル形状は、等価AMR-DMRヘッドにほぼ一致し、基本的な装置磁気学に関してそれらの機能が実質的に等価であることが示される。すなわち、DMRの感度が高められ、線形解像度が卓越する。この点は、前述の米国特許第5193038号に記載される。さらに、 $\Delta R/R$ がほぼ10%程度の磁気特性が同等なGMR多層膜がすでに実験室において形成されたこと事実(すなわち図5に示す場合)を考慮すれば、GMR-DMR再生ヘッドは、超高密度磁気記録の用途にとって、既存のAMR-DMR再生ヘッドを超える再生感度を向上させるといった重要な指令を潜在的に担っている。

【0036】GMR-DMR再生ヘッドから得られる利益には、上述のもの他、微小トラック幅MR再生ヘッドにおいて非常に重要なものがある。この微小トラック幅MR再生ヘッドでは、MRヘッドの作動面積を通じた(磁化回転による)異方性信号磁束伝播の3次元効果が重要になる。第1に、自己バイアスGMR-DMRの一方の半分の隣り合う磁性層がほぼ補角、すなわち、 $N$ 1に対して $\theta_n + \theta_{n+1} = \pi$ (図4参照)で磁化されるので、隣り合う一対の磁性層の回転磁束伝播軸(角度 $\theta_n \pm \pi/2$ に向いた)は、MR素子の作動面積を通じて媒体から信号磁束を拾い上げ、記録トラックの一侧に均等に伝播する。これによって、単一の狭トラックMR素子における交差トラックプロファイルにおいて広く知られる好ましくない非対称性を除去することができる。

【0037】第2に、自己バイアスGMR-DMRの向かい合う $\pm N$ 番目の二重対の磁性層は反平行に磁化されるので、すなわち、 $\theta_{-n} = \theta_n \pm \pi$ であるので、それら

の回転磁束伝播軸は必然的に平行である。この状態では、各二重対は、個々に（あるいは全ての奇数 $n$ または偶数 $n$ に対して共通して）、完全な反対称バイアスまたは「A-DMR」バイアスを構成し、これによって二重対のリラクスは最小となり、記録媒体の信号磁界の反対称成分 $H_{sig-a}$ によって生成される信号磁束に対する閉ループ磁束帰還路を形成する。

【0038】Smith et alが1994年3月発行「IEEE Trans. Magn.」vol 29に教示するように、A-DMR構造は狭トラック再生感度を最大限にする鍵となるだけでなく、非常に重要なことは、A-DMR構造によって、隣接トラッククロストーク干渉やミストラッキングによるオントラック信号歪みを最小限に抑える長手方向信号磁場の共通モード除去を提供することができる点である。図5において、最下曲線の傾き $d(\delta R)/dH$ が消失するのは、このような長手方向の共通モード除去を証明するものである。従来のDMRでは、A-DMRバイアス状態を初期化したり安定化したりするために製造困難な手段が必要となるが、GMR多層膜では、固有の層間交換結合作用の反強磁的性質によって、コストや複雑さを増大させることなく、自動的に、かつ、最適にこの機能を正確に提供される。

【0039】図8に示すGMR-DMRの一例における有効再生ギャップ $G^*=0.06\mu m$ は、たぶん既存の（AMRまたはGMRを用いた）シールドMR構造の実際の線形解像度限界を軽く超えている。これは、MRやその電流リード構造といったものからの距離が $G^*$ 以下に位置する導電磁性シールド構造からMR素子を電気的に絶縁する必要があるからである。GMR-DMR再生ギャップである $G^*=4N(g+t)/3$ をできる限り減少させて、将来の超高線記録密度で予測される線形解像度の必要条件を満たす必要がある。厚さ $t$ 、特に $g$ は、 $\Delta R/R$ 、 $H_{afc}$ やGMR多層材料のその他の固有特性を最適化するために選択することができると思われるので、層の数 $N$ は、図3および図4の実施例の $G^*$ を最適化する調節に利用することができる設計パラメータになると思われる。

【0040】図9はGMR-DMR素子の他の実施例を示す。この実施例では、有効磁気厚さ $T_M=Nt$ に依存せずに再生ギャップ $G^*$ を一層柔軟に設計できるようにするものである。再生ギャップ $G^*$ は記録媒体次第で最適に選択され、非線形歪みを抑えつつ適度な信号レベルにおける $(M_r\delta/M_s T_M)$ 係数が維持される。図9の実施例は、本質的に図3に示す実施例と同様であるが、ただし、中央に位置する比磁性導電層24の厚さが $g_0>g$ であることが異なる。このように厚みを増した中央非磁性導電層24は、他の非磁性導電層と同じ材料から成る。 $g_0\gg g$ の場合には、他の高電気抵抗材料から形成して「厚み」による電気シャントからの不可避な

信号損失を最小限にする。後者の場合、 $N=\pm 1$ 番目の磁性層間の交換結合は除去され、GMR-DMR構造の対向する半分同士の静磁結合が弱まる。この結果、中央非磁性導電層24を流れる最小シャント電流が中央非磁性導電層24の両側で向き合った多層間で $\langle \sin \theta_n \rangle$ の単極性を維持するためにも必要である。また、層24の上面から蒸着される第2半GMR多層膜の特性を維持することも必要となる。それらの特性は、既に蒸着された第1GMR多層膜の特性とほぼ均等となる。後者の条件は、中央非磁性導電層24に類似した組成の緩衝層14を使用することによって促進することができる。中央非磁性膜層24は、残りの非磁性膜層22よりも電気抵抗が大きいことが好ましい。

【0041】図10はさらに他の実施例を示し、 $2N$ 枚の非磁性導電層22と、 $(2N+1)$ 枚の磁性層16、18、20を備える。磁性層には中央磁性層28が含まれる。この実施例では、中央磁性層28は、厚さ $t_0>t$ を有する $n=0$ の磁性層であるように選択され、隣接する $n=\pm 1$ の磁性層間の強度または構成において可能であれば修正された交換結合を維持する。 $H_J$ によってバイアスがかからなければ、すなわち、 $\langle \sin \theta_n \rangle = 0$ の状態であれば、 $H_{bqc} > H_{afc} + H_k$ とすれば、中央磁性層28は、反対称バイアス状態 $\langle \sin \theta_{-n} \rangle = -\langle \sin \theta_n \rangle$ を安定化する際にも有用である。ただし、この実施例や上述の他の実施例では、バイアス角は $\theta_n + \theta_{-n} = 0$ を満たし、上述の真のA-DMRバイアス条件を満たしてはいない。それに関わらず、大きな $N \gg 1$ や、 $\theta_n + \theta_{n+1} = \pi$ である場合、すなわち、 $\theta_{-n} = \theta_{n+1} \pm \pi$ である場合には、一方の半多層の奇数 $n$ 層は、他方の半多層の偶数 $n$ 層とともに二重層「A-DMR」対を形成し、最適なA-DMR状態と非常に近い状態を維持することができる。

【0042】このため、合理的な素子高さ許容度を有する適度に高いセンス電流密度（すなわち、 $J_{opt} = \leq 3 \times 10^8 \text{ amp/cm}^2$ ）といった観点、製造複雑性や製造コストの増大、信号損失を伴わない最適バイアス構造状態の「組み込み(built-in)」安定性といった観点、高い感度( $\epsilon \geq 50\%$ 、 $\Delta R/R = 10\%$ )と卓越した線形解像力といった観点、等々、サブミクロン素子高さでの自己バイアス性能の様々な観点から、GMR-DMR再生ヘッドは、潜在的に、現在知られている他のMRヘッドよりも、サブミクロン素子高さおよびトラック幅で将来の超高密度磁気ディスク記録用途に独自に適する。

【0043】どのようにGMR-DMR構造を製造または処理するか、層間強磁性結合（交換結合か静磁結合）の原点の位置に関わらず、DMRに似た本質的な自己バイアス特性はGMR膜に対しても有効であるべきであって、このことは、Hylton et alが詳述するものと似て、GMR膜が、連続膜の層であるか非連続膜

の層であるか、任意に配向された異方性を持つかに拘わらない。

【0044】本発明の範囲には、一方の半多層の厚さ方向に沿ってバイアス一様性を向上する他の手法が含まれるものとする。そういった手法としては、可変厚み磁性層や可変厚み導電層によって層の厚み方向にわたって意図的に $H_{afc}$ を変更したり、誘導された異方性の方向を変更したりするものが含まれる。

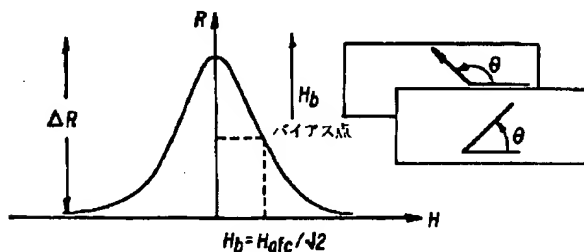
【0045】

【発明の効果】GMR-DMR多層膜は、シールドされず、適度な電流密度で自己バイアスがかけられ、従来のDMR再生ヘッドに固有な高密度再生性能を機能的に均等な役割を果たし、しかも、GMR材料の「巨大」磁気抵抗によって与えられる固有の感度を達成する。必要な垂直方向バイアスは、単に、非磁性層を跨いだ磁性層間の相互作用によって得られる。その際に、GMR-DMR構造を流れるセンス電流によって生じる磁界が影響する。従来技術のDMRヘッドの固有の高解像度は、GMR-DMRの動作で維持され、薄膜層のGMR動作によって提供される高出力信号能力と効率的に組み合わせられる。GMR-DMRセンサまたは再生ヘッドを、1ミクロン以下のトラック幅に記録された超高線密度を再生するために適したミクロン以下の要素高さで有利に構成し動作させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 ヒステリシスを除いた汎用GMR多層膜の固有R-H応答曲線を示す概略図と、任意の2枚の隣接する層の磁化の配向角度の概略図である。

【図1】



【図2】 一様な電流密度を有する薄膜導電体の内部磁界の空間分布を示す図である。

【図3】 第1の実施例に係るGMR-DMR再生ヘッド構造を示す断面図である。

【図4】 第1の実施例に係るGMR-DMR多層膜再生ヘッドにおける自己バイアスされた2N枚の磁性層の部分分解斜視図である。

【図5】  $2N=10$ であるGMR多層膜に様々なセンス電流密度が作用した場合に実験的に測定されたR-H曲線と、論理的シミュレーションによるR-H曲線を示すグラフ図である。

【図6】 構造の異なるGMR-DMRの素子高さに対する相対効率を示す理論グラフ図である。

【図7】 構造の異なるGMR-DMRの素子高さに対して最適なバイアスを得るためのセンス電流密度の理論グラフ図である。

【図8】 構造が異なるGMR-DMR再生ヘッドの固有スペクトル応答関数をコンピュータ数値計算し、形状特性および磁気特性が均等な既存DMR再生ヘッドと比較した理論グラフ図である。

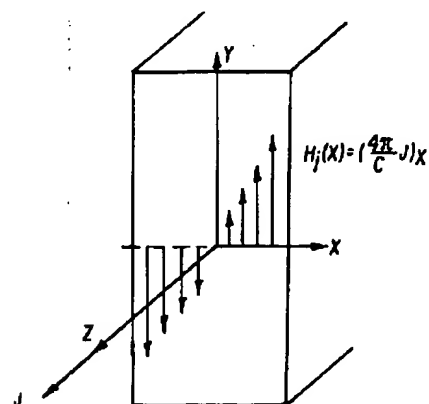
【図9】 他の実施例を示す断面図である。

【図10】 さらに別の実施例を示す断面図である。

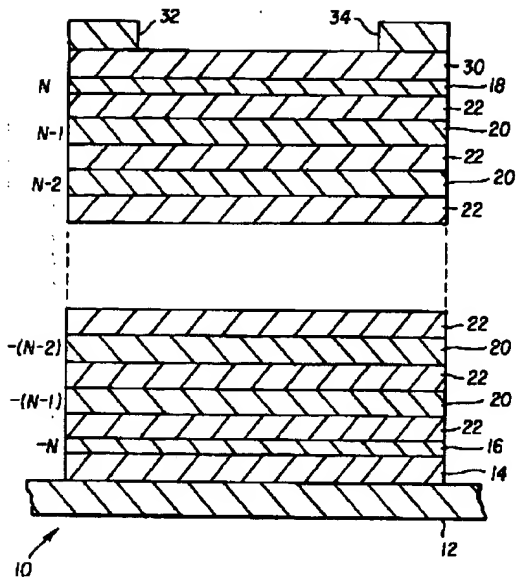
【符号の説明】

10 GMR-DMR再生ヘッドまたはセンサ構造、12 基板、14 緩衝層、16, 18 外側磁性導電層、20 内側磁性導電層、22 非磁性導電層、24 中央非磁性導電層、28 中央磁性層、30 導電不活性化層、32, 34 電流リード構造パターン。

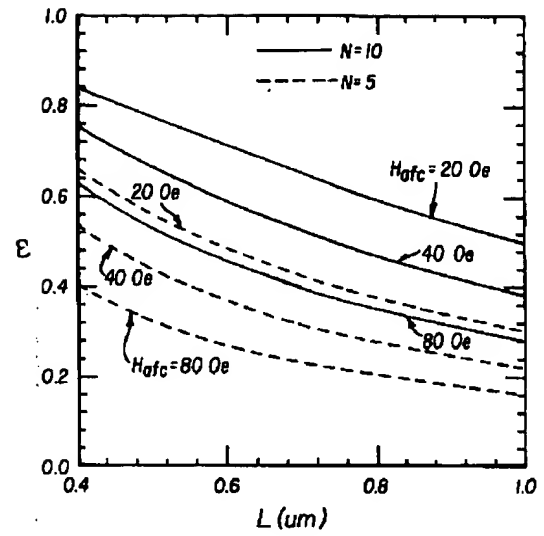
【図2】



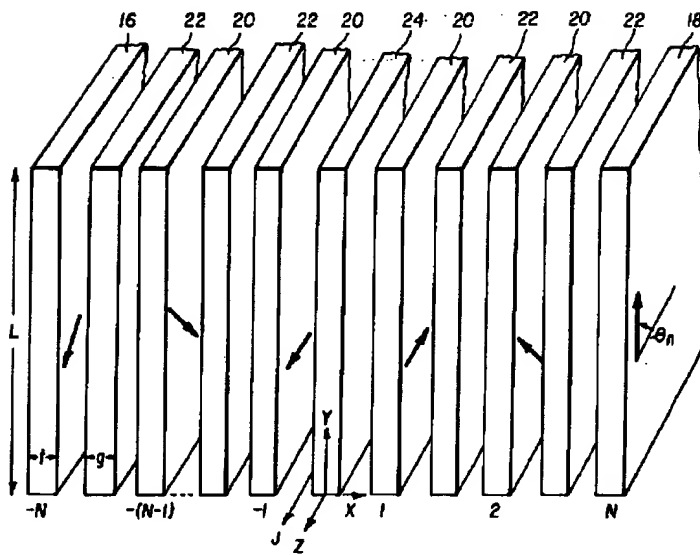
【図3】



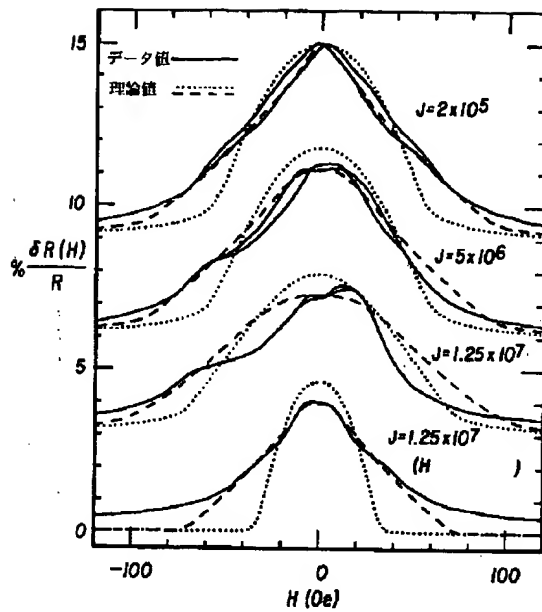
【図6】



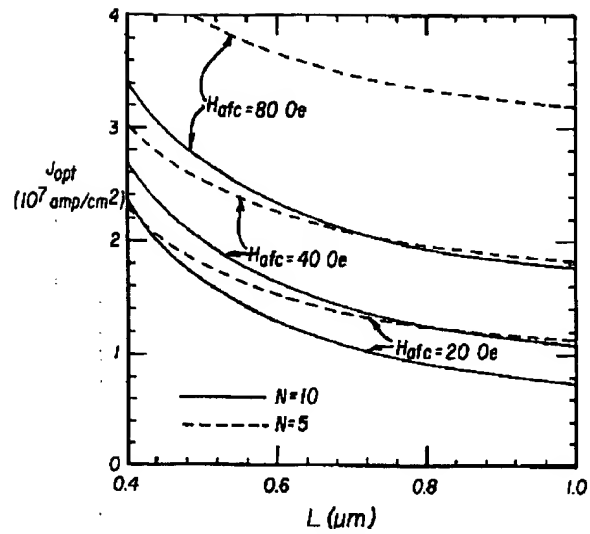
【図4】



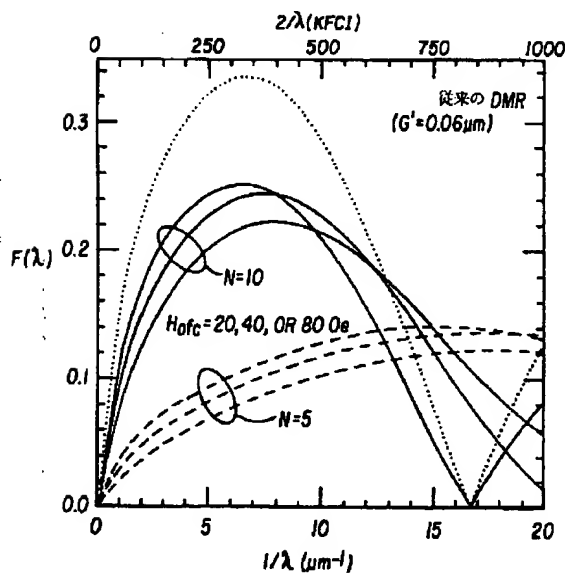
【図5】



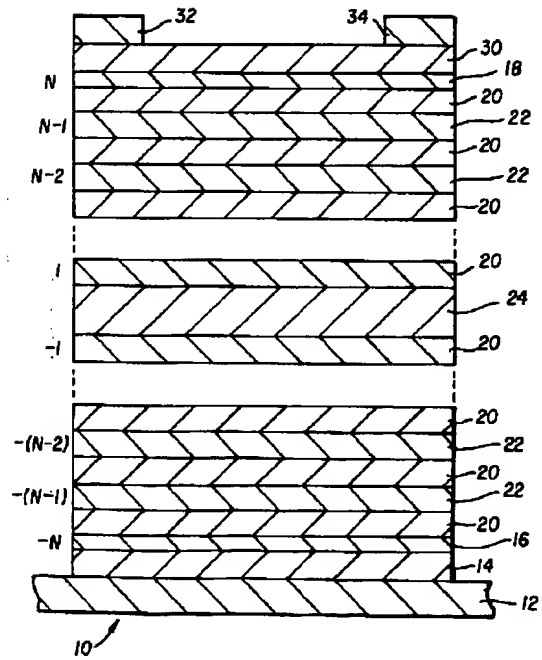
【図7】



【図8】



【図9】



【図10】

